

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-5-1274

EDN: DGSTTB

УДК 577.336:57.037



Научная статья

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОФЕЙНОЙ КИСЛОТЫ С ПОМОЩЬЮ РЕАКЦИИ СВЕТОИЗЛУЧЕНИЯ, КАТАЛИЗИРУЕМОЙ ПЕРОКСИДАЗОЙ ХРЕНА

*Н.О. Ронжин, Е.Д. Посохина,
О.А. Могильная, В.С. Бондарь*

Аннотация

Обоснование. Благодаря своей высокой антиоксидантной активности кофейная кислота обладает рядом положительных фармакологических эффектов. Для количественного определения кофейной кислоты в различных препаратах в настоящее время используются такие физико-химические методы как жидкостная и газовая хроматографии, УФ-спектрофотометрия, капиллярный электрофорез с масс-спектрометрией. Однако, перечисленные методы являются достаточно сложными и многостадийными, требуют специализированного оборудования и значительных затрат времени. Это определяет потребность поиска новых способов определения кофейной кислоты, отличающихся простотой, чувствительностью и эффективностью ее обнаружения. В настоящей работе нами выявлен эффект излучения квантов света при окислении кофейной кислоты пероксидазой хрена, данная реакция явилась предметом нашего изучения.

Цель. Исследовать некоторые основные показатели реакции люминесценции при окислении кофейной кислоты пероксидазой хрена и оценить возможность определения кофейной кислоты с помощью предложенного люминесцентного метода.

Материалы и методы. В экспериментах использовали реактивы высокой степени чистоты: пероксидазу из корней хрена (horseradish root peroxidase – HRP), кофейную кислоту, раствор перекиси водорода. Водные растворы реактивов для проведения экспериментов готовили *in situ* в деионизированной воде. Интенсивность и динамику световой эмиссии реакций регистрировали на люминометре. Люминесцентные сигналы измеряли в режиме одно измерение в секунду и выражали уровень световой эмиссии в относительных единицах.

Результаты. Установлено, что в присутствии пероксида водорода HRP катализирует окисление кофейной кислоты с величиной $K_m = 1.4 \times 10^{-4}$ М и обеспечивает реакцию светоизлучения в широком диапазоне pH с максимумом световой эмиссии при pH 8. В экспериментах *in vitro* показана применимость катализируемой HRP люминесцентной реакции для быстрого выявления и определения концентрации кофейной кислоты в водной среде. Установлено, что линейное увеличение регистрируемого светового сигнала наблюдается в диапазоне концентраций аналита 20–200 мкМ.

Заключение. Выявленная реакция светоизлучения является перспективной аналитической платформой и открывает возможности создания на ее основе новых люминесцентных сенсоров для тестирования кофейной кислоты в различных препаратах и экстрактах из биологических источников.

Ключевые слова: кофейная кислота; пероксидаза корней хрена; пероксид водорода; люминесценция

Для цитирования. Ронжин, Н. О., Посохина, Е. Д., Могильная, О. А., & Бондарь, В. С. (2025). Определение кофейной кислоты с помощью реакции светоизлучения, катализируемой пероксидазой хрена. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(5), 242-254. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-5-1274>

Original article

DETERMINATION OF CAFFEIC ACID USING A LIGHT EMISSION REACTION CATALYZED BY HORSERADISH PEROXIDASE

*N.O. Ronzhin, E.D. Posokhina,
O.A. Mogilnaya, V.S. Bondar*

Abstract

Background. Due to its high antioxidant activity, caffeic acid has a number of positive pharmacological effects. For the quantitative determination of caffeic acid in various preparations, some physicochemical methods, such as liquid and gas chromatography, UV spectrophotometry, capillary electrophoresis with mass spectrometry, are currently used. However, it is worth noting, that these methods are quite complex and multi-stage, require specialized equipment and significant time costs. This determines the need to search for new methods for determining

caffeic acid, distinguished by simplicity, sensitivity and efficiency of its detection. In this work, we have revealed the effect of light quantum emission during the oxidation of caffeic acid by horseradish peroxidase; this reaction was the subject of our study.

Purpose. To investigate some of the main performances of the luminescence reaction during the oxidation of caffeic acid by horseradish peroxidase and to evaluate the possibility of determining caffeic acid using the proposed luminescence method.

Materials and methods. The experiments were performed using high-purity reagents: horseradish root peroxidase (HRP), caffeic acid, and hydrogen peroxide solution. Aqueous solutions of the reagents for the experiments were prepared *in situ* in deionized water. The intensity and dynamics of the light emission of the reactions were recorded using a luminometer. Luminescent signals were measured in the mode of one measurement per second and the level of light emission was expressed in relative units.

Results. It was found that HRP catalyzes the oxidation of caffeic acid in the presence of hydrogen peroxide with a K_m value of 1.4×10^{-4} M and provides a light emission reaction in a wide pH range with a maximum light emission at pH 8. *In vitro* experiments demonstrated the applicability of the HRP-catalyzed luminescent reaction for rapid detecting and determining the concentration of caffeic acid in an aqueous medium. A linear increase in the recorded light signal is ensured in the analyte concentration range of 20–200 μ M.

Conclusion. The obtained results indicate that the discovered light emission reaction is a promising analytical platform and opens up the possibilities of creating new luminescent sensors on its basis for testing caffeic acid in various preparations and extracts from biological sources.

Keywords: caffeic acid; horseradish root peroxidase; hydrogen peroxide; luminescence

For citation. Ronzhin, N. O., Posokhina, E. D., Mogilnaya, O. A., & Bondar, V. S. (2025). Determination of caffeic acid using a light emission reaction catalyzed by horseradish peroxidase. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(5), 242–254. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-5-1274>

Введение

Кофейная (3,4-дигидроксикоричная) кислота входит в группу ароматических фенольных соединений, имеющих фенилпропаноидную (С6–С3) структуру [4]. Она является широко распространенным вторичным метаболитом, который содержится практически во всех растениях, расти-

тельных продуктах (фрукты, овощи, злаки, чай, кофе, какао, и т.д.) [19] и встречается в высших грибах [14]. Благодаря высокой антиоксидантной активности кофейная кислота обладает рядом положительных фармакологических эффектов – в частности, проявляет противовоспалительное, противоопухолевое, антидиабетическое, иммуномодулирующее и нейропротекторное действие [20; 1; 15]. В настоящее время для мониторинга кофейной кислоты в различных препаратах используют разные физико-химические методы, например: жидкостную и газовую хроматографии [10; 18], УФ-спектрофотометрию [3], капиллярный электрофорез с масс-спектрометрией [12]. При этом следует сказать, что указанные методы являются достаточно сложными и многостадийными, включают ряд промежуточных процедур предварительной подготовки образцов, требуют специализированного оборудования и значительных затрат времени. Это определяет потребность поиска новых способов определения кофейной кислоты, отличающихся простотой, чувствительностью и эффективностью ее обнаружения. В частности, для тестирования кофейной кислоты в последние годы активно разрабатываются различные электрохимические сенсоры [2; 5] и биосенсоры [8; 9]. В то же время следует отметить, что в доступной научной литературе мы не нашли информации о сенсорах определения кофейной кислоты на основе люминесценции. В настоящей работе нами выявлен эффект излучения квантов света при окислении кофейной кислоты пероксидазой хрена, что явилось предметом нашего дальнейшего изучения.

Цель – исследовать некоторые основные показатели реакции люминесценции при окислении кофейной кислоты пероксидазой хрена и оценить возможность определения кофейной кислоты с помощью предложенного люминесцентного метода.

Материалы и методы исследования

В экспериментах использовали высокочистую пероксидазу из корней хрена (horseradish root peroxidase – HRP) (EC 1.11.1.7), поставляемую фирмой Sigma (США); кофейную кислоту высокой степени чистоты ($\geq 98.0\%$, HPLC) (Sigma, США); 3% раствор перекиси водорода (ООО Тульская фармацевтическая фабрика, Россия). Для исследований водные растворы HRP, кофейной кислоты и H_2O_2 готовили *in situ* в деионизированной воде ($18.2 \text{ M}\Omega/\text{cm}$), полученной с помощью Milli-Q system (Millipore, США).

Способность HRP катализировать в присутствии пероксида водорода окисление кофейной кислоты с излучением квантов света оценивали сле-

дующим образом. При тестировании концентрация компонентов в водном объеме реакционной смеси 120 мкл составляла: 160 мкг/мл HRP; 0.02–1.33 mM кофейной кислоты; 3.7–147 mM пероксида водорода. Концентрации кофейной кислоты и H_2O_2 в реакционной смеси варьировали для изучения зависимостей интенсивности световой эмиссии. Эффективность функционирования HRP в реакции светоизлучения в зависимости от pH среды оценивали с использованием серии 50 mM Na-ацетатных буферов со значениями pH от 4 до 10.

Интенсивность и динамику световой эмиссии при тестировании регистрировали на люминометре GloMax[®] 20/20 (Promega BioSystems Sunnyvale, Inc., США). Измерения проводили следующим образом. В прозрачные пластиковые пробирки объемом 1.5 мл (Axugen Scientific, Inc., США) вносили водные растворы HRP и H_2O_2 . Пробирки устанавливали в измерительную камеру люминометра и регистрировали исходный уровень люминесценции образцов, который во всех случаях соответствовал уровню фонового шума прибора. После этого к содержащим фермент и пероксид водорода образцам добавляли 5 мкл водного раствора кофейной кислоты и вновь регистрировали интенсивность и динамику световой эмиссии. Люминесцентные сигналы тестировали в режиме одно измерение в секунду и выражали уровень световой эмиссии в относительных единицах. Каждый вариант измерения проводили в трех повторах.

Результаты и обсуждение

В исследованиях мы установили, что добавки кофейной кислоты в содержащую HRP и H_2O_2 реакционную смесь приводят к развитию люминесцентного сигнала, максимальная интенсивность которого превышает исходный уровень свечения от нескольких раз до нескольких десятков раз, в зависимости от концентрации добавляемого вещества. Как следует из полученных данных (рис. 1), после добавления кофейной кислоты к тестируемому образцу происходит быстрый (в течение 1–1.5 мин) рост уровня световой эмиссии с достижением максимума интенсивности. После этого наблюдается медленное (в течение 15–20 мин) экспоненциальное снижение светового сигнала (рис. 1). Рассчитанные константы скорости подъема (k_{rise}) и спада (k_{decay}) для реакции составили 0.055 и 0.006 соответственно. При этом следует отметить, что в контрольных экспериментах добавление пероксида водорода к образцам, содержащим только HRP, или только кофейную кислоту, не сопровождалось какими-либо изменениями исходного уровня их люминесценции.

Хорошо известно, что каталитическая активность HRP обеспечивается циклической окислительно-восстановительной трансформацией иона железа, входящего в состав гема активного центра фермента, и включает три ферментативные стадии (HRP, HRP-I, HRP-II) [6]. Это позволяет предполагать, что и катализируемое HRP окисление кофейной кислоты (как донора водорода) в присутствии H_2O_2 (как акцептора водорода) с излучением света осуществляется по такому же механизму и обеспечивается окислительно-восстановительными превращениями гемового железа в активном центре фермента.

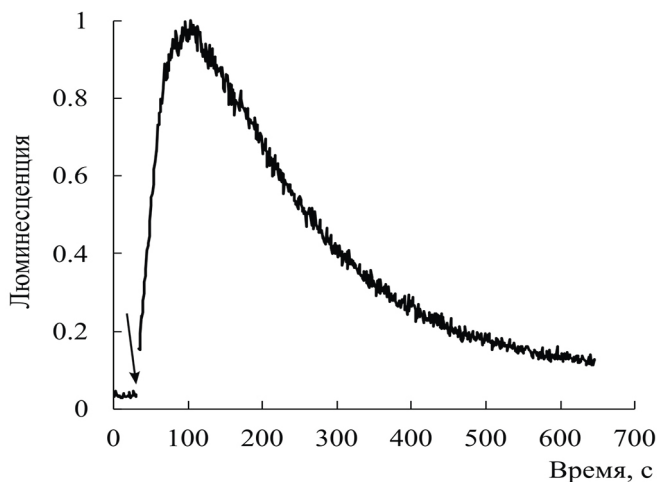


Рис. 1. Интенсивность и динамика люминесцентного сигнала, регистрируемого при окислении кофейной кислоты HRP в присутствии пероксида водорода. Стрелкой показан момент добавления кофейной кислоты в реакционную смесь HRP – H_2O_2 . Представленные данные нормированы на максимальное значение уровня световой эмиссии.

С использованием серии 50 мМ Na-ацетатных буферов со значениями pH от 4 до 10 в работе была изучена эффективность функционирования HRP в реакции окисления кофейной кислоты в зависимости от pH среды. Как показали эксперименты (рис. 2а), во всем указанном диапазоне pH фермент в присутствии H_2O_2 катализирует окисление кофейной кислоты с излучением квантов видимого света. При этом наибольшую каталитическую эффективность фермент проявляет в интервале pH от 7 до 9, обеспечивая максимальную световую эмиссию при pH 8.

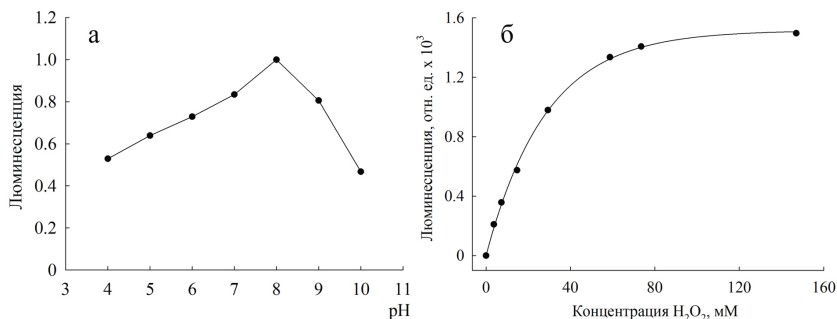


Рис. 2. Интенсивность люминесценции реакции HRP – H_2O_2 – кофейная кислота: (а) – в зависимости от pH среды, (б) – в зависимости от концентрации пероксида водорода. Данные на рисунке (а) нормированы на максимальное значение интенсивности световой эмиссии в ряду измерений.

Изучение влияния концентрации пероксида водорода на интенсивность люминесцентного сигнала катализируемой HRP реакцией окисления кофейной кислоты показало следующее (рис. 2б). В диапазоне концентраций пероксида водорода 0–15 мМ наблюдается практически линейная зависимость увеличения уровня световой эмиссии. При дальнейшем увеличении концентрации H_2O_2 в реакции рост интенсивности люминесценции замедляется и плавно выходит на плато при концентрации пероксида водорода выше 80 мМ.

Варьирование концентрации кофейной кислоты в катализируемой HRP реакции позволило получить зависимость интенсивности регистрируемого люминесцентного сигнала от содержания субстрата в пробе (рис. 3). Расчеты константы Михаэлиса, проведенные из данных полученной зависимости, показали, что в использованных нами экспериментальных условиях HRP катализирует окисление кофейной кислоты с величиной K_m , составляющей 1.4×10^{-4} М. Анализ полученной зависимости показал, что в диапазоне концентраций кофейной кислоты 0–0.2 мМ регистрируется практически линейное возрастание уровня световой эмиссии. Дальнейшее увеличение концентрации субстрата в реакции сопровождается нелинейным ростом интенсивности световой эмиссии с ее выходом на плато при концентрации кофейной кислоты около 0.7 мМ. В результате, в работе нами была построена линейная калибровочная зависимость (коэффициент детерминации $R^2 = 0.99$) люминесцентного сигнала от концентрации кофейной кислоты, позволяющая проводить количественное определение данного аналита в диапазоне от 20 до 200 мкМ (рис. 3, вставка). Получен-

ная в работе аналитическая область определения кофейной кислоты была оценена в сравнении с аналитическими диапазонами, которые обеспечивают некоторые другие разработанные сенсоры, основанные на разных принципах детекции (таблица 1). Анализ этого сравнения показал, что диапазон выявляемых концентраций кофейной кислоты при использовании люминесцентного метода сопоставим с порядками величин детектируемых концентраций этого аналита при использовании других методов.

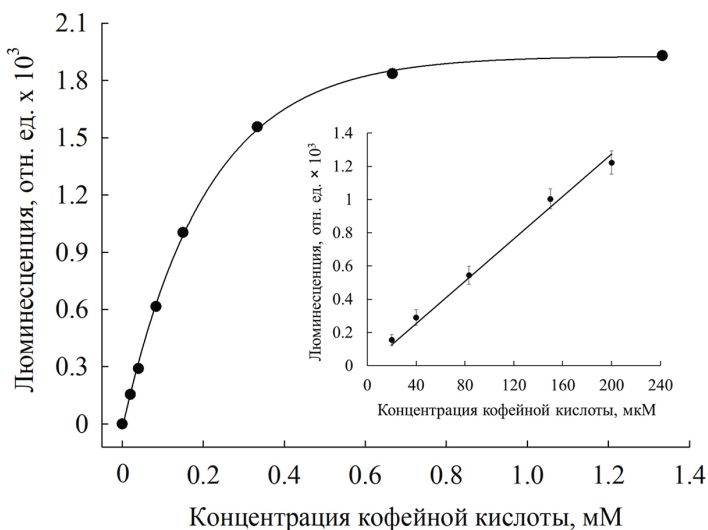


Рис. 3. Зависимость интенсивности люминесцентного сигнала от концентрации кофейной кислоты в водной пробе. На вставке: диапазон линейной зависимости интенсивности люминесцентного сигнала от концентрации кофейной кислоты (20–200 мкМ).

Таблица 1.

Сравнение аналитических диапазонов определения кофейной кислоты у ряда сенсоров, основанных на разных принципах детекции

Компонентный состав сенсора / реакции	Принцип	Линейный диапазон, мкМ	Ссылка на работу
CuZnOx/MWCNTs/GCE	Амперометрия	1–100	[13]
GO-PTC/SPE	Квадратно-волновая вольтамперометрия	5–100	[17]
Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-tyrosinase PEDOT-Tyr	Циклическая вольтамперометрия	10–300	[7]

NGC/GCE	Хроноамперометрия	50–1000	[16]
G-quadruplex/hemin DNAzyme	Флуориметрия	2–350	[11]
HRP–H ₂ O ₂	Люминесценция	20–200	эта работа

Заключение

Совокупность экспериментальных данных проведенного исследования позволяет нам резюмировать полученные в работе результаты и сделать следующие выводы.

1. В представленной работе обнаружен эффект генерации квантов света при окислении кофейной кислоты пероксидазой из корней хрена (HRP) в присутствии пероксида водорода.

2. Установлено, что HRP в присутствии H₂O₂ катализирует окисление кофейной кислоты с величиной $K_m = 1.4 \times 10^{-4}$ М и обеспечивает реакцию светозлучения в широком диапазоне pH с максимумом световой эмиссии при pH 8.

3. В экспериментах *in vitro* продемонстрирована применимость катализируемой HRP люминесцентной реакции для быстрого выявления и определения концентрации кофейной кислоты в водной среде. Установлено, что при окислении кофейной кислоты, катализируемой HRP, линейное увеличение регистрируемого светового сигнала наблюдается в диапазоне концентраций аналита 20–200 мкМ.

4. В целом, результаты проведенных исследований свидетельствуют, что обнаруженная нами реакция окисления кофейной кислоты под действием HRP является перспективной аналитической платформой и открывает возможности для создания на ее основе новых люминесцентных сенсоров для практического применения в медицине и пищевой промышленности. Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию предложенного метода тестирования и повышение его чувствительности.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FWES-2024-0018).

Список литературы / References

1. Alam, M., Ahmed, S., Elsbali, A. M., et al. (2022). Therapeutic implications of caffeic acid in cancer and neurological diseases. *Frontiers in Oncology*, 12,

860508. <https://doi.org/10.3389/fonc.2022.860508>. EDN: <https://elibrary.ru/LZZRHU>
2. Albu, C., Eremia, S. A. V., Veca, M. L., et al. (2019). Nano-crystalline graphite film on SiO₂: Electrochemistry and electro-analytical application. *Electrochimica Acta*, 303, 284–292. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.02.093>. EDN: <https://elibrary.ru/IYYBSJ>
 3. Bounegru, A. V., & Apetrei, C. (2021). Laccase and tyrosinase biosensors used in the determination of hydroxycinnamic acids. *International Journal of Molecular Sciences*, 22, 4811. <https://doi.org/10.3390/ijms22094811>. EDN: <https://elibrary.ru/QGNTUC>
 4. Cai, N., Li, Y., Chen, S., et al. (2016). A fluorometric assay platform for caffeic acid detection based on the G-quadruplex/hemin DNAzyme. *Analyst*, 141, 4456–4462. <https://doi.org/10.1039/C6AN00543H>
 5. Deng, Y., & Lu, S. (2017). Biosynthesis and regulation of phenylpropanoids in plants. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 36, 257–290. <https://doi.org/10.1080/07352689.2017.1402852>. EDN: <https://elibrary.ru/YFNCHR>
 6. Dodeigne, C., Thunus, L. N., & Lejeune, R. (2000). Chemiluminescence as diagnostic tool: A review. *Talanta*, 51, 415–439. [https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(99\)00294-5](https://doi.org/10.1016/S0039-9140(99)00294-5). EDN: <https://elibrary.ru/LTTDQV>
 7. Duan, Q., Cao, J., & Zhang, J. (2012). Analysis of phenolic acids and their antioxidant activity by capillary electrophoresis-mass spectrometry with field-amplified sample injection. *Analytical Methods*, 4, 3027–3032. <https://doi.org/10.1039/C2AY25437A>. EDN: <https://elibrary.ru/RKNRGB>
 8. García-Guzmán, J. J., López-Iglesias, D., Cubillana-Aguilera, L., et al. (2019). Assessment of the polyphenol indices and antioxidant capacity for beers and wines using a tyrosinase-based biosensor prepared by sinusoidal current method. *Sensors*, 19, 66. <https://doi.org/10.3390/s19010066>
 9. Heleno, S. A., Martins, A., Queiroz, M. J., et al. (2015). Bioactivity of phenolic acids: Metabolites versus parent compounds: A review. *Food Chemistry*, 173, 501–513. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.10.057>
 10. Kalinke, C., Zanicoski-Moscardi, A. P., de Oliveira, P. R., et al. (2020). Simple and low-cost sensor based on activated biochar for the stripping voltammetric detection of caffeic acid. *Microchemical Journal*, 159, 105380. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.105380>. EDN: <https://elibrary.ru/UVGMLF>
 11. Khan, F., Bamuniarachchi, N. I., Tabassum, N., et al. (2021). Caffeic acid and its derivatives: Antimicrobial drugs toward microbial pathogens. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69, 2979–3004. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c07579>. EDN: <https://elibrary.ru/FNNKIH>

12. Oršolić, N., Sirovina, D., Odeh, D., et al. (2021). Efficacy of caffeic acid on diabetes and its complications in the mouse. *Molecules*, *26*, 3262. <https://doi.org/10.3390/molecules26113262>. EDN: <https://elibrary.ru/WITWFA>
13. Razboršek, M. I., Ivanović, M., & Kolar, M. (2021). Validated stability-indicating GC-MS method for characterization of forced degradation products of trans-caffeic acid and trans-ferulic acid. *Molecules*, *26*, 2475. <https://doi.org/10.3390/molecules26092475>. EDN: <https://elibrary.ru/IHWYEW>
14. Sikora, F. J., & McBride, M. B. (1990). Aluminum complexation by protocatechuic and caffeic acids as determined by ultraviolet spectrophotometry. *Soil Science Society of America Journal*, *54*, 78–86. <https://doi.org/10.2136/sssaj1990.03615995005400010012x>
15. Sorgi, C. A., de Campos Chaves Lamarque, G., Verri, M. P., et al. (2021). Multifaceted effect of caffeic acid against *Streptococcus mutans* infection: Microbicidal and immunomodulatory agent in macrophages. *Archives of Microbiology*, *203*, 2979–2987. <https://doi.org/10.1007/s00203-021-02290-x>. EDN: <https://elibrary.ru/VYNNNZ>
16. Trifan, A. G., & Apetrei, I. M. (2023). Development of novel electrochemical biosensors based on horseradish peroxidase for the detection of caffeic acid. *Applied Sciences*, *13*, 2526. <https://doi.org/10.3390/app13042526>. EDN: <https://elibrary.ru/GZZLVG>
17. Tudose, M., Baratoiu-Carpen, R. D., Anghel, E. M., et al. (2021). A novel composite based on pyrene thiazole grafted on graphene oxide: Physico-chemical characterization and electrochemical investigations. *Materials Chemistry and Physics*, *262*, 124315. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124315>. EDN: <https://elibrary.ru/UKGPRW>
18. Wang, X., Li, W., Ma, X., et al. (2015). Simultaneous determination of caffeic acid and its major pharmacologically active metabolites in rat plasma by LC-MS/MS and its application in pharmacokinetic study. *Biomedical Chromatography: BMC*, *29*, 552–559. <https://doi.org/10.1002/bmc.3313>
19. Xie, A., Wang, H., Zhu, J., et al. (2021). A caffeic acid sensor based on CuZnOx/MWCNTs composite modified electrode. *Microchemical Journal*, *161*, 105786. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.105786>. EDN: <https://elibrary.ru/OIBXCP>
20. Zamarchi, F., Silva, T. R., Winiarski, J. P., et al. (2022). Polyethylenimine-based electrochemical sensor for the determination of caffeic acid in aromatic herbs. *Chemosensors*, *10*, 357. <https://doi.org/10.3390/chemosensors10090357>. EDN: <https://elibrary.ru/UCKHOE>

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Ронжин Никита Олегович, канд. биол. наук, с.н.с. лаборатории нанобиотехнологии и биолюминесценции

*Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
Академгородок, 50-50, г. Красноярск, 660036, Российская Федерация
roniol@mail.ru*

Посохина Екатерина Дмитриевна, м.н.с. лаборатории нанобиотехнологии и биолюминесценции

*Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
Академгородок, 50-50, г. Красноярск, 660036, Российская Федерация
posokhinaed@bk.ru*

Могильная Ольга Алексеевна, канд. биол. наук, с.н.с. лаборатории нанобиотехнологии и биолюминесценции

*Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
Академгородок, 50-50, г. Красноярск, 660036, Российская Федерация
ol_tog@mail.ru*

Бондарь Владимир Станиславович, доктор биол. наук, заведующий лабораторией нанобиотехнологии и биолюминесценции

*Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
Академгородок, 50-50, г. Красноярск, 660036, Российская Федерация
bondvs@mail.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Nikita O. Ronzhin, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Nanobiotechnology and Bioluminescence

Institute of Biophysics FRC KSC SB RAS

50-50, Akademgorodok, Krasnoyarsk 660036, Russian Federation

roniol@mail.ru

SPIN-code: 1369-0940

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0735-3362>

Scopus Author ID: 55619945000

Ekaterina D. Posokhina, Junior Researcher, Laboratory of Nanobiotechnology and Bioluminescence

Institute of Biophysics FRC KSC SB RAS

50-50, Akademgorodok, Krasnoyarsk 660036, Russian Federation

posokhinaed@bk.ru

SPIN-code: 9160-4279

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8276-9213>

Scopus Author ID: 57212486616

Olga A. Mogilnaya, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Nanobiotechnology and Bioluminescence

Institute of Biophysics FRC KSC SB RAS

50-50, Akademgorodok, Krasnoyarsk 660036, Russian Federation

ol_mog@mail.ru

SPIN-code: 7083-0380

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1792-1602>

Scopus Author ID: 6507466380

Vladimir S. Bondar, Doctor of Biological Sciences, Head of Laboratory of Nanobiotechnology and Bioluminescence

Institute of Biophysics FRC KSC SB RAS

50-50, Akademgorodok, Krasnoyarsk 660036, Russian Federation

bondvs@mail.ru

SPIN-code: 8382-4517

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1555-6514>

Scopus Author ID: 7005781920

Поступила 15.01.2025

После рецензирования 20.02.2025

Принята 06.03.2025

Received 15.01.2025

Revised 20.02.2025

Accepted 06.03.2025